

利用力反馈和触觉运动诱导驾驶模拟器的自我运动感觉

纪尧姆·布耶尔[✉]

法国Evry Val d'Esson大学, IBISC

Amine Chellali[†]

法国Evry Val d'Esson大学, IBISC

Anatole Lécuyer[‡]

法国Inria公

司

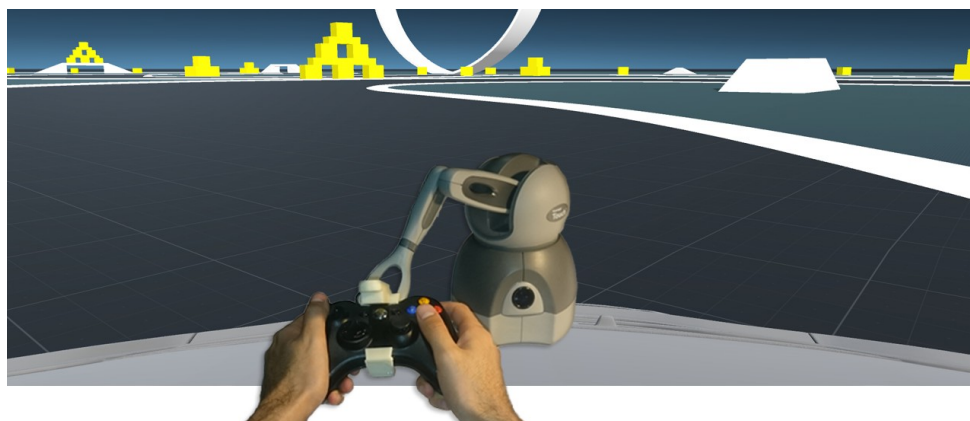


图1: 我们的方法包括在驾驶模拟过程中, 通过施加在操纵的控制器上的力反馈来模拟自我运动的感觉。我们的原型是以视频游戏为背景的: 用户使用一个经典的游戏手柄控制导航, 该手柄被物理地连接到一个标准的力反馈装置的末端。触觉力与模拟中车辆的虚拟加速度成正比。例如, 刹车和加速阶段是通过在游戏板上施加纵向力来模拟的。

摘要

在驾驶模拟器中产生运动感觉通常需要使用繁琐而昂贵的运动平台。在这篇文章中, 我们提出了一种新的替代方法, 即依靠触觉反馈在驾驶模拟器中产生自我运动的感觉。该方法包括将与虚拟车辆的加速度相关的力反馈直接应用到驾驶员的手上, 通过连接到被操纵的控制器 (或方向盘) 的触觉装置。我们设计了一个概念验证, 基于一个标准的游戏手柄, 物理上连接在一个标准的3DOF触觉显示器的末端。触觉效果被设计成与虚拟车辆的加速/制动 (纵向力) 和左/右转 (横向力) 明显匹配。一项对23名参与者进行的初步研究表明, 触觉运动效果全面提高了有触觉设备经验的参与者的参与度和运动感觉的真实性, 他们参与了基于游戏板的主动VR直线导航。综上所述, 我们的结果表明, 我们的方法可以进一步测试并用于娱乐和/或专业背景下的驾驶模拟器中。

关键词: 驾驶模拟, 自我运动, 触觉, 力反馈。

索引条款: H.5.1 [多媒体信息系统]: 艺术、增强和虚拟现实-评估/方法学;

H.5.2 [用户接口]: 以用户为中心的设计-触觉I/O

[✉]e-mail: guillaume.bouyer@ibisc.univ-evry.fr

[†]e-mail: amine.chellali@ibisc.univ-evry.fr

[‡]e-mail: anatole.lecuyer@inria.fr

2017年IEEE虚拟现实 (VR) 会议

2017年3月18-22日, 美国加州洛杉矶

978-1-5090-6647-6/17/\$31.00 ©c 2017

IEEE

1 简介

驾驶模拟器是虚拟现实技术的一个重要和早期的应用[2, 16]。今天, 驾驶模拟器被广泛用于娱乐 (如视频游戏, 街机, 主题公园), 但也有专业背景。它们可以用来研究驾驶员或车辆的行为[6, 11, 13], 设计驾驶辅助系统[14], 设计和测试嵌入式人机界面的可及性[25,26]或道路基础设施[28]。为了提高驾驶模拟的真实性并提供真实的自我运动感觉, 这些模拟器可以依靠运动平台[23], 而这些平台通常都很笨重且价格昂贵。文献中偶尔也会探讨其他的解决方案, 比如使用振动反馈[24, 27]或前庭刺激[1, 17]。然而, 这些技术往往不能以一种舒适和可持续的方式再现真实的自我运动感觉。

有趣的是, 在多媒体和视听体验的背景下, 一些研究人员最近表明, 在被动观看视频时, 使用施加在坐着的用户手上的力反馈可以成功地产生强烈的自我运动感觉[7-9, 20]。这种被称为 "触觉运动" 的现象被证明在虚拟三维导航过程中成功地产生了更高的运动感觉 (自我运动的错觉), 与单独使用视觉反馈相比, [20]。然而, 这些结果是在被动的情况下获得的, 也就是说, 用户是被动地感知感官反馈, 不能控制虚拟导航--这在驾驶模拟中是必须的。

在本文中, 我们为驾驶模拟器提出了一种新的方法, 与传统的运动平台相比, 它通过力反馈提供自我运动的感觉 (图1), 成本低廉。它将 "触觉运动" 范式扩展到驾驶模拟的环境中, 并扩展到 "主动" 导航的情况。我们已经设计了一个概念验证系统, 重点是视频

游戏环境。我们的原型是基于一个固定在标准3DOF触觉设备末端的游戏手柄。触觉效果的设计主要是为了模拟虚拟车辆的加速/刹车的纵向力，以及左/右转的横向力。我们还进行了一项试点研究，以评估23名参与者在我们的系统和接触触觉运动效果时的主体体验。

在本文的其余部分，我们首先介绍了自我运动模拟的相关工作。然后，我们介绍了我们方法的概念和基本思路，接着描述了我们的概念验证系统的组成部分，以及力反馈计算的模型。然后，我们介绍了我们的设计和对天真的参与者进行的初步研究的结果。本文以讨论和总的结论结束。

2 相关工作

自我运动的感觉不仅对驾驶模拟至关重要，而且对许多VR应用（游戏、培训、虚拟访问、城市项目审查等）也是如此[18]。自我运动的感觉来自于各种感觉渠道的结合：视觉、前庭、触觉、本体感觉、音频等。使用视觉反馈仍然是诱发运动感觉的一个简单方法。它可以产生矢量，一个众所周知的自我运动的错觉[3]。视觉通道也被发现能很好地适应检测静脉定位，但不是加速度[21]。

在驾驶模拟器中创建自我运动感觉的最常用的解决方案是前庭或运动平台[30]。最先进的系统有一个驾驶舱，包括全部或部分的仪器车辆和360度的视觉显示，都安装在一个大型机器人平台上。物理控制和显示设备的使用，如方向盘、踏板、仪表盘和镜子，有望提高用户驾驶体验的真实性。这些物理平台得到了逼真的前庭反馈的补充，使人产生纵向和横向加速的错觉。然而，这些平台有几个缺点。第一个是与它们的尺寸有关。事实上，为了产生大规模位移的前庭反馈，这些平台需要一个大工作空间（几十平方米）。其他主要问题包括：它们的成本（数百或有时数百万美元[4]），以及其控制系统的复杂性[10]。基于各种感官刺激，已经探索了产生自我运动感觉的替代解决方案[1, 5, 12, 17, 19, 25, 27]。这包括振动触觉界面、本体感觉界面（如跑步机）或通过内耳电刺激前庭系统的电刺激。尽管如此，还是会出现一些问题，如：长期使用的不适感，刺激方向的紧张，或缺乏关于感知加速度大小的信息。

在被动虚拟导航的背景下，Ouarti等人[20]最近表明，与单纯的位移视觉反馈相比，手部的触觉力反馈可以极大地改善整个身体的运动感觉。研究者们将这种效果称为“触觉运动”。更特别的是，触觉反馈对发生的频率、持续时间、幻觉的发生以及自我运动感觉的主观意图都有明显的影响。对不同的力计算模型进行了比较。与虚拟摄像机的三维加速度成比例的触觉反馈和视觉反馈相结合，被认为对自我运动的感知有最重要的影响。与虚拟摄像机的速度相对应的力反馈对自我运动感觉的影响较小，但仍比没有触觉反馈的影响大。有趣的是，研究人员还比较了在相同和相反方向上显示的力反馈。

视觉运动，他们发现这两种模型都是同样的由参与者选择（50-50%）。

在多媒体应用方面，Danieau等人[7-9]提出了“触觉运动”的应用，以增加被动视频观看体验中的运动感受。他们设计了“HapSeat”系统（一个触觉座椅），它在扶手和头枕的水平上（在用户的手上和头上）应用力反馈，与视频或摄像机的运动同步。这种力反馈的存在被认为大大地提高了用户体验的质量，特别是重新认识、沉浸感和用户满意度。但这些结果是在被动的（视频）观看体验中获得的，而不是在主动的情况下，如在驾驶模拟器中，用户可以控制导航。

关于消费者应用，出现了一些用于驾驶电子游戏的运动平台（例如Accelid DS3¹）。但它们仍然很笨重而且相对昂贵。力反馈控制器也是专门为电子游戏市场设计的（例如，用于赛车游戏的1DOF触觉方向盘，用于飞行模拟的2或3 DOF操纵杆或Novint Falcon）。然而，触觉反馈在这里并不是用来重现运动和自我运动感觉的。它主要是用来增加模拟控制器操作的真实性。例如，目前在电子游戏和/或驾驶模拟器中使用的力反馈方向盘通常只围绕滚动轴驱动，并模拟与操纵真实方向盘有关的感觉。力反馈也可以用来传递及时的信息或模拟与车辆与环境的相互作用有关的特殊效果和特定事件（碰撞、滑行、打滑或道路偏离）。据作者所知，这些商业设备中还没有一个被用来改善自我运动的感觉。

因此，在这种情况下，我们的目标是利用“触觉运动”方法，以改善主动驾驶模拟情况下的自我运动感觉。

3 用力反馈诱导驾驶模拟器中的自我运动感觉的新方法

3.1 概念和一般想法

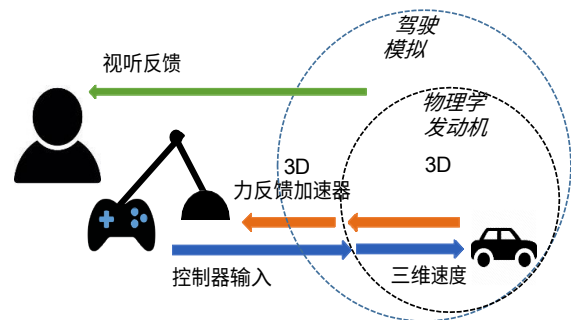


图2：我们在驾驶模拟中使用力反馈诱导自我运动感觉的一般架构。

当我们坐在一辆行驶中的汽车的方向盘后面时，我们的身体会感知到几种力和运动信息。我们的前庭感觉感知到：（1）在加速和制动阶段与纵向加速度有关的力，（2）在转弯时与横向加速度有关的力，以及（3）与重力有关的力。第二，我们的本体感觉系统可以感知与汽车部件（方向盘、踏板、座椅等）接触有关的力。

¹<http://www.accelid.co.at/>

为了增加驾驶模拟器中自我运动的感觉，我们提出了一种方法，它保留了本体感觉，并通过用户的手通过触觉通道传递一些前庭效应。

我们的总体概念包括通过操纵的控制器--方向盘、游戏手柄、操纵杆等，在用户手中应用力反馈。这种力反馈提示与虚拟车辆的行为运动有关，预计会引起强烈的自我运动感觉。这种效果被称为“触觉运动”[20]，在被动的情况下被发现是非常成功的，也就是说，用户正在经历一个他/她无法控制的预定的导航。在我们的案例中，在驾驶模拟的背景下，用户命令虚拟车辆的导航。这种方法的一个主要优点是，它允许产生时间上更长或无限的加速度，而不受界面的联合停止的限制。用户可以抵抗恒定加速度的力反馈，而不超过设备的工作空间[20]。此外，这种方法在理论上可以用6DOF触觉反馈覆盖所有的空间方向（纵向、侧向、垂直加速度），这在前庭刺激平台上是很复杂的。

我们的方法的主要组成部分和结构如图2所示。类似于汽车或传统的驾驶模拟器，用户通过控制器（这里是游戏手柄，但也可能是任何输入设备，包括方向盘和踏板）控制虚拟车辆。利用这一输入，VR驾驶模拟根据虚拟车辆的物理参数和三维环境的特征（坡度、碰撞、重力、摩擦等）计算出虚拟车辆的位置和加速度。一个力模型将虚拟车辆的三维加速度转化为三维力，通过连接到控制器的力反馈副器反馈给用户。控制器和触觉装置也可以在一个一体化的硬件系统中以集成的方式进行设计（例如，带有纵向执行器的方向盘）。力反馈装置的自由度数量在某种程度上限制了可以模拟的触觉运动效果的种类。一个一自由度的力反馈装置可以应用纵向力并模拟加速和制动阶段，而一个三自由度的装置可以额外模拟转弯和垂直运动。

此外，就像任何驾驶模拟器一样，用户体验可以通过使用其他感官反馈来增强，例如可以明显增加加速（发动机噪音）和刹车（刺耳的轮胎声）的感觉的听觉效果。

3.2 概念验证



图3：概念验证的设置，基于一个大屏幕和一个连接到3DOF触觉设备的游戏手柄。



图4：游戏手柄在3DOF触觉设备上的组装，带有定制的3D打印支架和插孔连接器。

我们设计了一个概念验证的方法，如图3所示。力反馈是基于一个3DOF触觉设备（Geomagic Touch，售价约1800美元）。放入的设备是一个游戏手柄（微软XBox 360）。它被安装在触觉设备上，使用一个定制的3D打印支架和一个插孔连接器（见图4）。虚拟导航的控制技术是基于经典的游戏手柄的映射（见图5.a）。虚拟车辆的加速/制动是通过游戏板的右/左模拟触发器来控制的（在模拟驾驶中向前/向后移动虚拟车辆）。转向（左/右）是用左手拇指杆控制的。

虚拟环境显示在一个带有集成扬声器的显示器（37英寸）上。虚拟现实应用程序是使用Unity 3D与C#进行设计签名的。该模拟是基于Unity 3D标准资产中免费提供的的一个驾驶游戏²。力反馈是在Unity 3D中使用Kirurobos C#包装器为Geomagic Touch触觉设备设计的 [15]。力的编译依靠的是Unity 3D的集成物理引擎。

3.3 力量-反馈模型

力反馈模型描述了如何利用用户的指令来计算“运动力反馈”（见图5）。用户通过控制器控制虚拟车辆的速度和方向（见图5.a）。基于这些输入，以及车辆的物理特性和虚拟环境，模拟计算并更新车辆的位置/方向。然后在车辆的参考框架内计算出结果的三维速度和三维加速度（见图5.b）。然后用低通滤波器对加速度的每个XYZ分量进行过滤、缩放，并根据自己的参考框架传送到触觉设备（见图5.c）。

最终触觉力的直接计算结果是这样的
在公式1中， \vec{F} 是力反馈输出， \vec{a} 是虚拟车辆的加速度， \vec{k} 是增益向量。这使我们能够为每个轴设置不同的增益因子，这可以明显地用于增强纵向效应而不是横向效应，或者用于消除重力效应。

$$\vec{F} = \vec{k} \cdot \vec{a} \quad (1)$$

我们提出了两种不同的力反馈模型，取决于力的方向与车辆的三维加速方向相比：“相同方向”模型（HSD）和“相反方向”模型（HOD）。事实上，以前在被动情况下观察到，触觉运动效果的首选方向似乎在参与者中随机分布[20]。

²www.assetstore.unity3d.com/en/content/32351

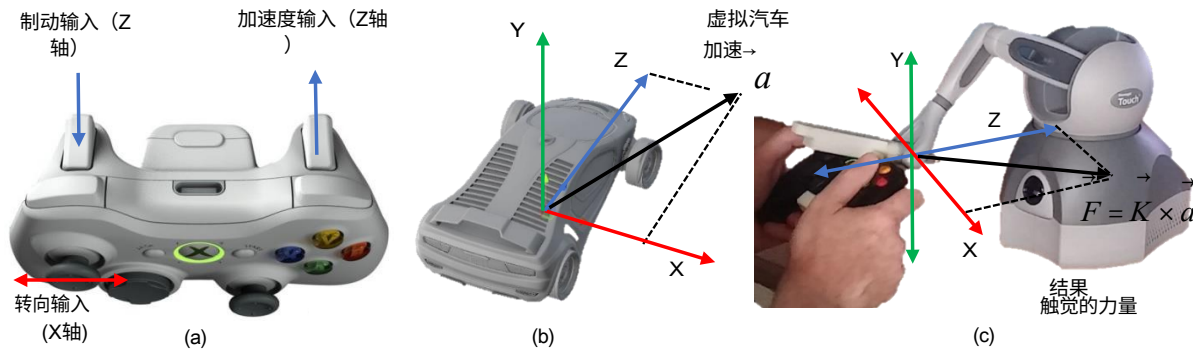


图5：我们的力反馈模型的不同步骤特写。(a) 游戏板上的经典汽车控制映射。(b) 虚拟车辆参考框架。(c) 触觉力反馈装置的参考框架。

我们可以注意到真实驾驶和我们的触觉方法之间的有趣联系（见图6）。当在一辆加速的汽车上握住方向盘时，身体会经历一个向后的力，这使手臂伸展开来，把他从方向盘上推开。同样地，当显示的方向与虚拟加速相同时，我们的触觉反馈将手拉向前方，这就使用户的手臂伸展开来。相反，当减速或刹车时，身体被推近方向盘，我们的触觉效果将手推向身体。在转弯时，身体受到离心力的作用，倾向于向转弯的外侧移动，这使它手的关系发生了变化。HSD模型将用户的手移向转弯的内侧。在这种情况下，力的反馈模仿了汽车的位置，身体和手的几何关系被保留下来。相反，当力被显示在与加速度相反的方向（HOD）时，我们将通常施加在身体上的力转移到手上。

有趣的是，我们的方法可以用来传达除纵向和横向位移之外的其他运动感觉。事实上，由于模型直接传递了虚拟交通工具的三维加速度，用户可以自然地（因此）感知到：碰撞、重力效应（如坡道跳跃、垂直下降），或由虚拟环境引起的任何其他运动（如颠簸）。

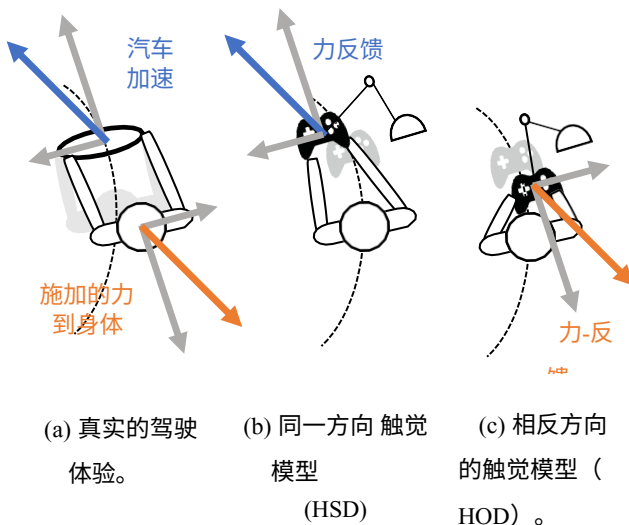


图6：两种力反馈模型的说明。同向触觉模型（b），力反馈的方向与汽车加速度相同，模仿汽车位移。用相反方向的触觉模型（c），力反馈的方向与汽车加速度相反，模仿汽车的位移。

3.4 结果

我们的概念验证工作对我们的驾驶模拟应用的原始帧率（75FPS）没有可测量的影响，我们没有观察到关于触觉渲染的不稳定问题（在带有游戏显卡的标准PC上）。图7显示了在两种不同情况下计算出来并反馈给用户的力：（a）线性加速/刹车阶段；（b）一系列的左/右转弯。在我们的驾驶模拟中，物理引擎的速度模型是非线性的，完全的制动比完全的加速更有力（制动时的力是瞬间逆转的）。人们可以观察到，尽管触觉工作区的尺寸小于150毫米，但施力的持续时间可能很长（在这个例子中是15秒的加速）。事实上，我们发现用户自然倾向于抵制力的反馈，以保持对车辆的控制。这证实了我们的方法与前庭平台相比的一个优势：可以长时间地施加刺激。图7.b显示了虚拟速度和力的横向分量，在恒定的纵向速度下，先左后右的转弯序列的样本。它显示了转弯过程中横向速度的突然变化，导致了加速度的峰值。作为附带说明，我们可以注意到正面碰撞可能导致速度的瞬间下降，因此并不总是传递到触觉设备上。但是，其他由于颠簸或地面纹理引起的移动会产生可靠的力和沿垂直轴的强烈感觉。

4 用户研究

我们进行了一项用户研究，以评估触觉效果在简单的驾驶模拟中对用户体验的影响：一条有一系列加速/制动阶段的直路。我们用一份调查问卷来比较不同情况下的用户体验：有无触觉反馈（HSD或HOD模型）或没有（控制条件）。

4.1 参与者

共有23名天真无邪的参与者（18名男性，5名女性；22名右撇子，22-47岁，平均=27.7，SD=7.5）参加了这项研究。他们都是来自大学的学生或工作人员。其中11人报告说过使用触觉设备的经验，而其他12人以前从未使用过任何触觉设备。九人报告说经常玩电子游戏（每周至少一次）。他们中没有一个人以前重新移植过运动和驾驶模拟器的经验。

4.2 实验设计

实验采用了主体内设计，有一个独立的变量--触觉反馈模型，有三个条件：无触觉反馈（控制条件，CC），同方向触觉反馈（CC）。

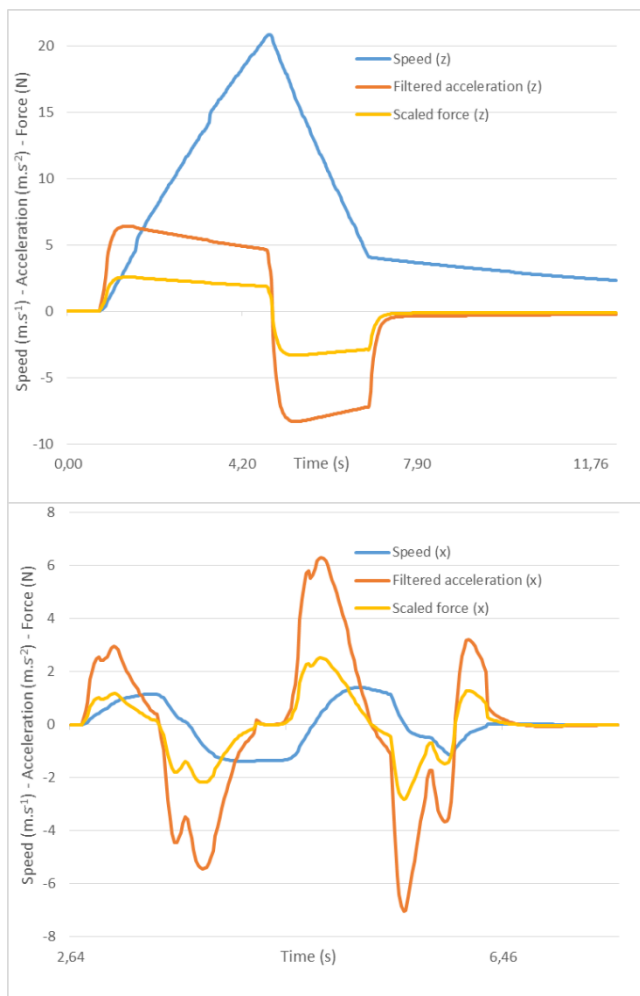


图7：在（上）一连串的加速和刹车以及（下）一连串的左转和右转过程中，虚拟速度、加速度和力被送回给用户的例子（触觉增益 $K = 0.4$ 和低通滤波器 $RC = 0.1$ ）。

HSD），其显示的力与虚拟汽车位移的方向相同；相反方向触觉模型（HOD），其显示的力与虚拟汽车位移的方向相反。这两种情况下的触觉增益 K 都等于1。

4.3 任务和程序

在进行实验之前，参与者完成了一份详细说明人口统计学的调查问卷。然后，他们被要求阅读实验说明表。之后，他们坐在显示器前，被要求以舒适的方式握住游戏手柄。然后，他们被允许在一个虚拟电路中自由驾驶汽车，以熟悉该系统。在这个熟悉期，所有的力反馈条件都在30秒内显示。之后，实际的实验开始了。

参与者被要求在一个只有直线的简化虚拟电路中驾驶汽车。在每次试验开始时，屏幕上会显示第一条信息，要求参与者加速。一旦虚拟汽车到达一个预定的位置，就会显示第二条信息，要求参与者刹车。在汽车到达另一个预定的位置后，第一条信息再次显示，要求他们加速，如此反复。每个试验共进行了3个加速和3个刹车阶段。每个条件共进行了3次试验。实验结束后

表1：Witmer和Singer存在问题表[29]的部分项目。

编码	问题
Q1	你在里面的运动感有多逼真？ 虚拟环境？
Q2	你在虚拟环境中的经验有多少？ 精神似乎与你的现实世界的经验一致？
Q3	你是如何参与到虚拟环境中的？ 经验？
Q4	你与环境的互动有多自然？ 似乎？
Q5	在你的交流会上，你经历了多大的延迟？ 观念和预期结果？
Q6	控制装置在多大程度上干扰了 执行分配的任务？

在一个条件下进行了3次试验后，参与者被要求填写一份调查问卷，以评估他们在这个特定条件下的用户体验。之后，他们被要求对下一个条件执行同样的任务。在完成所有3个条件的试验后，参与者被要求填写一份最后的问卷，以比较3个实验条件并给出他们对实验的反馈。为了避免任何学习效应，3种条件的呈现顺序是平衡的。

4.4 数据收集和分析

我们从Witmer和Singer的临场感调查问卷[29]中选择了一组相关的项目来评估用户的主观体验（表1）。每个问题都使用了7点李克特量表（完全不同意/不满足到完全同意/非常满意）。对参与者的答案进行分组，并计算出每个项目的平均评分。为了比较每个条件下的平均分数，我们使用了弗里德曼和威尔科逊检验（对序数数据的非参数检验）。此外，参与者被要求根据他们的偏好对三种触觉条件进行排名。最后，参与者有机会对他们使用该系统的经验进行评论。

4.5 结果

表2总结了参与者对6个选定问题的回答。弗里德曼测试显示，触觉反馈对动作的真实性和对虚拟世界体验的参与度有显著影响。没有观察到其他明显的差异。使用Wilcoxon测试进行的配对比较表明，参与者在有触觉反馈的情况下（HSD和HOD条件）比没有（CC条件）感觉动作更真实（ $Z=-2.30$ ， $p=0.02$ ； $Z=-2.02$ ， $p=0.04$ ）。更重要的是，测试表明，在HSD和HOD条件下，参与者比在CC条件下更能感觉到参与到虚拟世界的体验中（ $Z=-2.16$ ， $p=0.03$ ； $Z=-2.83$ ， $p=0.005$ ）。两种触觉条件之间没有发现明显的差异。

我们根据参与者玩电子游戏的频率和他们使用触觉设备的经验来比较他们的答案（图8）。结果显示，玩电子游戏的频率没有显著影响，而触觉反馈对动作的真实性的显著影响只出现在有过触觉设备经验的参与者身上。此外，触觉反馈对参与虚拟世界体验的显著影响（Q3）只在以前没有接触过触觉设备的参与者中发现。用Wilcoxon测试进行的配对比较表明，以前使用过触觉设备的参与者在HSD条件下感到动作更真实。

表2：问卷调查结果。

问题	平均得分			弗里德曼测试	
	CC	HSD	负责人	χ^2	P- 价值 观
Q1--现实主义的 运动	3.63 (1.42)	4.48 (1.46)	4.41 (1.15)	6.24	0.04
问题2 - 坚持 与现实世界	3.65 (1.77)	4.22 (1.59)	4.26 (1.48)	3.51	0.17
Q3 - 参与度 在VE的经验中	4.17 (1.70)	5.00 (1.51)	5.13 (1.58)	7.37	0.02
Q4 - 自然性 的互动	4.52 (1.47)	4.74 (1.29)	4.52 (1.47)	0.91	0.63
问题5--对 延迟	2.52 (1.56)	2.52 (1.56)	2.30 (1.43)	0.80	0.66
Q6 - 干扰 控制装置的	3.65 (1.61)	3.48 (1.86)	3.78 (1.93)	0.03	0.98

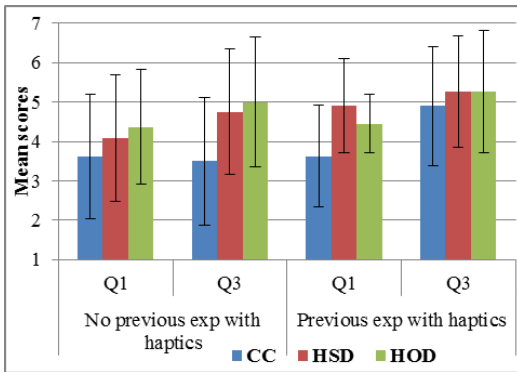


图8：参与者根据他们以前使用触觉设备的经验所做的回答（误差条代表标准偏差）。

在HSD和HOD条件下比在CC条件下更有参与感 ($Z=-2.23$, $P=0.02$)。另一方面，从未使用过触觉设备的参与者在HSD和HOD条件下比在CC条件下更能感觉到参与虚拟体验 ($Z=-2.05$, $p=0.04$; $Z=-2.52$, $p=0.01$)。没有发现其他显著差异。

最后，结果表明，86%的参与者喜欢触觉反馈条件（HSD或HOD），只有13%的人喜欢没有任何触觉反馈的条件（CC）。对触觉设备和视频游戏的经验对这些选择没有显著影响。关于触觉模型的分布，我们的结果显示，两种模型都得到了同样的赞赏，43%的参与者喜欢它们中的每一种。

5 讨论

我们的用户研究结果表明，我们的方法可以在简单的驾驶模拟（直线）中成功地改善用户体验。绝大多数的参与者（86%）都喜欢用触觉反馈来执行驾驶任务，无论使用何种触觉模型。此外，与没有触觉反馈的情况相比，两种触觉模型都大大增加了对于虚拟世界体验的参与感和对运动的真实性的感知。实验结束后，我们还收到了来自参与者的非常积极的评价：“太神奇了”，“我把这种体验当作真实的生活”，“当我加速的时候，我有一种被粘在座位上的感觉，就像在一辆真实的汽车上一样”。

我们在实验中的观察表明，由于用户是活跃的，他/她为了能够按下按钮，会很用力地握住控制器。因此，他/她自然会抵制这些力量。此外，交互的自然性、控制设备的干扰以及对输入和输出之间延迟的感知并没有受到触觉效果存在的明显影响（问题Q4、Q5和Q6的得分相似）。这表明，在驾驶过程中，增加我们的触觉反馈并不会对交互产生负面影响。在转弯序列中进行的信息测试显示了类似的结果，但需要专门的实验来证实这些发现。

我们的结果还表明，所有参与者对触觉效果的感受是不一样的。事实上，触觉效果增加了从未使用过触觉设备的参与者的参与度，而对于那些曾经使用过触觉设备的参与者来说，它们增加了运动的真实性（但只是在HSD条件下）。这可以通过人类行为的Rasmussens技能、规则和知识模型来解释[22]。这个模型声称，个人对其活动的有意识控制的程度取决于对任务和环境的熟悉程度。根据这个模型，基于知识的行为水平需要最高程度的有意识的参与和关注，当一个人面对一个新的情况时（例如，一个受训者在他/她的训练开始时），就会观察到。这可能是我们的参与者在没有触觉经验的情况下的情况。这导致他们更加关注这种新的情况（触觉互动），从而更加投入到虚拟环境的体验中。另一方面，基于技能的行为水平需要最低程度的有意识参与，其特点是高度常规化和自动化的活动。这就是专家在家庭环境中执行任务的情况。这可能是我们的参与者的情况，他们以前有使用触觉的经验。他们对触觉互动的惊讶程度较低，能够更专注于其余方面的情况，如对运动的感知。然而，当力的显示方向与加速度相同时，只对有触觉经验的用户来说，运动的真实性会增加。因此，需要进行更深入的分析以更好地理解这一现象。

我们的结果显示，两种触觉模型之间的偏好没有显著差异。一半的参与者倾向于力的方向与加速度相同，而另一半则倾向于相反的方向。这个结果证实了以前关于“触觉运动”的研究[8,20]，但在我们的案例中，是对“主动”导航的观察。我们的观察表明，一些参与者发现，显示的触觉反馈有时是“相反的”，取决于模型。例如，当虚拟车辆向前行驶时，他们被推到后面而不是被拉到前面。一位参与者在HOD条件下说，*加速的感觉真的很有趣，与现实世界中的驾驶感觉相似*。而他在HSD条件下评论说：“*加速的感觉几乎是令人不安的，不一定与驾驶体验相似。然而，刹车更类似于一个人在现实世界中可以体验到的*”。因此，这名参与者总是倾向于当力量将手推回身体时。未来的工作似乎有必要进一步描述这种变异性和用户特征的潜在影响。同时，用户应该有可能选择触觉效果的方向（类似于第一人称射击游戏中鼠标控制的选择）。

至于系统的改进，我们的参与者建议，“*触觉的力量也应该应用在椅子上*”。另一位参与者认为，该模拟缺乏“*换挡的感觉*”。最后，第三位参与者认为，“*有一个方向盘和踏板来控制车辆，将提高模拟的真实性*”。

与游戏板相比，驾驶体验”。除了这些改进之外，我们认为在未来的工作中，还可以进行补充性的用户研究。我们可以首先评估我们的方法在其他驾驶模拟环境中的应用（例如在转弯时，或在复杂的轨迹中），并考虑到驾驶性能，例如。将我们的方法与游戏运动平台和/或方向盘进行比较也很有趣。

6 总结

我们提出了一种方法，利用“触觉运动”范式，在驾驶模拟器中产生自我运动的感觉，其中用户主动控制车辆的位移。我们的方法包括通过连接在操纵控制器上的触觉装置，将与虚拟车辆的加速度成比例的力反馈直接作用在驾驶员的手上。它允许产生长时间和多方向的自我运动刺激。触觉效果被设计成与虚拟车辆的加速/制动（纵向力）和左/右转（横向力）明显匹配。我们设计了一个概念验证系统，该系统成本效益高，结构紧凑，特别是与前庭平台相匹配。一项初步的研究，集中在一个简单的直线驾驶模拟上，表明我们的触觉效果的存在是全球性的，并改善了用户体验。综上所述，我们的结果表明，这种方法可以进一步测试并用于各种娱乐和/或专业背景下的驾驶模拟器中。

鸣谢

作者希望感谢南巴黎电信公司和ENSIIE学校的Raoul Bernard、Mathilde Gilbert和Alexandre Jureidini的贡献。

参考文献

- [1] S.G. T. Balter, M. H. Castelijns, R. J. Stokroos, and H. Kingma.前庭雪旺瘤患者的电流诱导的身体摇摆：刺激中央前庭系统的证据。 *Acta Oto-Laryngologica*, 124(9):1015-1021, Nov 2004.
- [2] S.Bayarri, M. Fernandez, and M. Perez.用于驾驶模拟的虚拟现实。 *Communications of the ACM*, 39(5):72-76, may 1996.
- [3] A.Berthoz, B. Pavard, and L. Young.周边视觉诱导的线性水平自我运动的感知（linearvection）的基本特征和视觉-触觉的相互作用。 *Experimental Brain Research*, 23(5):471-489, Nov 1975.
- [4] S.伯奇梅赛德斯-奔驰的世界级驾驶模拟器综合体增强了麋鹿的安全性。 13 nov. 2010 (accessed 15 sept. 2016) <http://articles.sae.org/9084/>.
- [5] J.E. Bos, J. van Erp, E. L. Groen, and H.-J. van Veen. 前庭-触觉关于运动感知和眼球运动的相互作用。 *前庭研究杂志*, 15（3）：149-160, 2005.
- [6] S.M. Cox, D. J. Cox, M. J. Kofler, M. A. Moncrief, R. J. Johnson, A.E. Lambert, S. A. Cain, and R. E. Reeve.患有自闭症谱系障碍的新手司机的驾驶模拟器表现：执行功能和基本运动技能的作用。 *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(4):1379-1391, apr 2016.
- [7] F.Danieau, J. Fleureau, A. Cabec, P. Kerbiriou, P. Guillotel, N. Mollet, M.Christie, and A. Lecuyer.用运动的触觉效果增强视频观看体验的框架。在2012年IEEE触觉研讨会（HAPTICS）上，第541-546页。IEEE，2012年3月。
- [8] F.Danieau, J. Fleureau, P. Guillotel, N. Mollet, M. Christie, and L.阿纳托尔.Toward Haptic Cinematography: Enhancing Movie Experience with Haptic Effects based on Cinematographic Camera Motions To cite this version :*IEEE MultiMedia, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*., pages 11-21, 2014.
- [9] F.Danieau, J. Fleureau, P. Guillotel, N. Mollet, A. Le´cuyer, M.Christie, and A. Le´cuyer.HapSeat：用嵌入在座位上的多个力反馈设备产生运动感觉。在第18届ACM虚拟现实软件和技术研讨会的论文中。

技术-VRST'12,第69页,美国纽约,纽约,2012。ACM出版社。

- [10] J. de Winter, P. van Leeuwen, and R. Happee. 驾驶模拟器的优势和劣势：一个讨论。In A. Spink, F. Grieco, O. Krips, L. Loijens, L. Noldus, and P. Zimmerman, editors, *Measuring Behavior*, pages 47-50, Utrecht, The Netherlands, 2012.
- [11] C. Dijksterhuis, D. de Waard, K. A. Brookhuis, B. L. J. M. Mulder, and R. de Jong. 利用受试者特定的空间大脑模式对驾驶模拟器中的视觉运动工作量进行分类。 *Frontiers in Neuroscience*, 7, 2013.
- [12] I. Farkhatdinov, N. Ouarti, and V. Hayward. 脚部的振动触觉输入可以调节矢量。在 *IEEE 2013 世界触觉会议 (WHC)* 上, 第 677-681 页。IEEE, apr 2013.
- [13] D. Hallvig, A. Anund, C. Fors, G. Kecklund, J. G. Karlsson, M. Wahde, and T. Åkerstedt. 真实道路上的困倦驾驶与模拟器中的比较。 *事故分析与预防*, 50:44-50, 2013.
- [14] B. Hassan, J. Berssenbrugge, I. Al Qaisi, and J. Stocklein. 用于高级驾驶辅助系统测试和培训的可重新计算的驾驶模拟器。In *2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pages 337-339. IEEE, jul 2013.
- [15] Kirurobo. <https://github.com/kirurobo/ManagedPhantom>, 一个c#(.net) 包装器, 用于可感知的幻影设备。
- [16] W.-S. Lee, J.-H. Kim, and J.-H. Cho. 一个作为虚拟现实工具的驾驶模拟器。In *Proceedings. 1998 年 IEEE 国际机器人和自动化会议*, 第一卷, 第 71-76 页。IEEE, 1998 年。
- [17] T. 前田, H. 安藤, T. 雨宫, N. 长谷, M. 杉本, 和 M. In-ami. 撼动世界。在 *ACM SIGGRAPH 2005 新兴技术中*, 第 17 页, 美国加州洛杉矶, 2005。ACM 出版社。
- [18] M. E. McCauley 和 T. J. Sharkey. Cybersickness: 虚拟环境中对自身运动的感知。 *存在: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(3):311-318, jan 1992.
- [19] N. Ouarti and V. Hayward. 脚上的特殊振动触觉信号促进了自我运动的体验。在 Theo Murphy 会议上, 关于 Active 触摸感应, 2011。
- [20] N. Ouarti, A. Lecuyer, and A. Berthoz. 触觉运动: 用力反馈改善虚拟世界中自我运动的感觉。在 *IEEE 触觉研讨会上, HAPTICS*, 第 167-174 页。IEEE, 2014 年 2 月。
- [21] B. Pavard 和 A. Berthoz. 线性加速度改变了移动视觉场景的感知速度。 *Perception*, 6(5):529-40, 1977.
- [22] J. Rasmussen. 信息处理和人机交互: An Approach to Cognitive Engineering, 1986.
- [23] G. Reymond 和 A. Kemeny. 雷诺驾驶模拟器中的运动提示。 *车辆系统动力学*, 34 (4) : 249-259, 2000 年 10 月。
- [24] B. Riecke, J. Schulte-Peikum, F. Caniard, and H. Bulthoff. 在虚拟现实实现中实现精简和优雅的自我运动模拟。在 *IEEE 论文集《虚拟现实》* 中, 第 131-138 页。IEEE, 2005 年。
- [25] D. Salvucci. 预测车载界面的使用对驾驶员表现的影响: 一种综合模型方法。 *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(1):85-107, 2001.
- [26] J. Sodnik, C. Dicke, S. Tomaz'ic, and M. Billingham. 对驾驶时使用的听觉与视觉界面的用户研究。 *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(5):318-332, 2008.
- [27] A. Valjamae, P. Larsson, D. Vastfjall, and M. Kleiner. 听觉诱导的自我运动和空间存在的振动触觉增强。 *音频工程学会杂志*, 54 (10) : 954-963, 2006。
- [28] F. Vienne, S. Caro, L. De'sire', J. Auberlet M, F. Rosey, and E. Dumont. 驾驶模拟器: 一个测试新道路基础设施的创新工具。在 *TRA- 交通研究领域*, 第 10 页, 2014。
- [29] B. G. Witmer and M. J. Singer. 测量虚拟环境中的存在感: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225-240, jun 1998.
- [30] E. Zeeb. 戴姆勒新的全尺寸高动态驾驶模拟器技术概述。In A. Kemeny, F. Merienne, and S. Espie, editors, *Proceedings of the Driving simulation conference Europe 2010*, pages 157-165, Paris, France, 2010. INRETS.